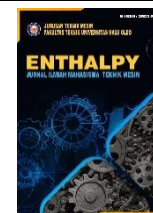
ENTHALPY: Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin

Journal homepage: http://ojs.uho.ac.id/index.php/ENTHALPY

Pengujian Sistem Torefaksi Kayu Jati Menggunakan *Microwave*

Sarifudin[1)], Lukas Kano Mangalla[2)], La ode Ahmad Barata[3)]
[1]Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo
[2'3] Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo
Jl. H.E.A. Mokodompit, Kampus Hijau Bumi Tridarma Andounohu, Kendari 93232
Email: sarifudinudin883@gmail.com

Article Info

Available online Febrruari 14, 2022

Abstrak

Torefaksi merupakan perlakuan panas terhadap sebuah biomassa mentah untuk mendapatkan bahan bakar yang lebih stabil, memiliki kepadatan energi yang tinggi dan kerapuhan yang lebih tinggi dan mudah dihaluskan. Adapun tujuan penelitian ini yaitu Untuk mengetahui perubahan sifat-sifat fisik, nilai kalor ketahanan serapan air (*hidrophobic*) pada kayu jati setelah proses torefaksi di microwave. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode eksperimen dengan menggunakan pemanas Microwave yang dilengkapi dengan alat ukur seperti thermometer digital, dan timbangan digital. Bahan biomassa yang digunakan adalah kayu jadi yang dipotong dengan ukuran sampel model 1 (kubus 3 x 3 cm), Model 2 (persegi panjang 7 x 3 x 3 cm), dan Model 3 (tabung silinder 7 x 3 cm). Setiap bahan tersebut dimasukkan kedalaman *microwave* untuk dilakukan torefaksi selama 15, 25, 35 menit. Hasil penelitian menunjukkan pada sampel model 2 mengalami perubahan massa yang paling besar 80,95%, kemudian diikuti model 3 dengan perubahan massa sebesar 76,47% dan Model 1 yang mengalami perubahan massa sebesar 70%. Semakin lama mengalami radiasi gelombang elektromagnetik dalam microwave maka perunahan massa semakin besar dan semakin rendah serapan airnya.

Kata kunci: Torefaksi, kayu jati, *microwave*, nilai kalor, nilai kadar air

Abstract

Torrefaction is a heat treatment of raw biomass to obtain a fuel that is more stable, has a high energy density and higher brittleness and is easy to grind. The purpose of this study is to determine changes in physical properties, calorific value of water absorption resistance (hydrophobic) in teak wood after the torrefaction process in the microwave. The method used in this study is an experimental method using a microwave heater equipped with measuring instruments such as a digital thermometer, and digital scales. The biomass material used was finished wood cut with sample sizes of Model 1 (cube 3 x 3 cm), Model 2 (rectangular 7 x 3 x 3 cm), and Model 3 (cylindrical tube 7 x 3 cm). Each material was put in a microwave depth for torrefaction for 15, 25, 35 minutes. The results showed that the model 2 sample experienced the largest mass change of 80.95%, followed by model 3 with a mass change of 76.47% and Model 1 which experienced a mass change of 70%. The longer you experience electromagnetic wave radiation in the microwave, the greater the mass change and the lower the water absorption.

Keywords*: Torrefaction, teak wood, microwave, calorific value, moisture content*

1. Pendahuluan

Pohon Jati cocok tumbuh di daerah musim kering agak panjang yaitu berkisar 3-6 bulan pertahun. Besarnya curah hujan yang dibutuhkan rata-rata 1250-1300 mm/tahun dengan temperatur rata-rata tahunan 22-26°C. Daerah-daerah yang banyak ditumbuhi Jati umumnya tanah bertekstur sedang dengan pH netral hingga asam [1].

Jati (*Tectona grandis* L.f.) dikenal sebagai kayu komersial bermutu tinggi, termasuk dalam suku *Verbenaceae.* Daerah sebaran asli dari jati meliputi India, Myanmar, dan Thailand. Jati pertama kali ditanam di Indonesia (di Pulau Jawa) diperkirakan pada abad ke-2 Masehi, yang

dilakukan oleh para penyebar agama Hindu. Saat ini jati telah dikenal secara luas dan dikembangkan oleh pemerintah, swasta, dan petani [2].

Indonesia memiliki luas area pertanaman jati yang relatif tinggi. Sampai tahun 1975, tercata tada sekitar 774.000 hektar tanaman jati yang sebagian besar berada di Jawa, Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, NTB, Maluku, Lampung Dan Bali. Kayu jati memiliki kandungan yang sebagian besar terdiri dari *selulosa* (40- 50%), *hemiselulosa* (20-30%), *lignin* (20-30%) dan sejumlah kecil bahan-bahan anorganik, (Fengel dan Wegener, 1995) dan sejumlah kecil bahan-bahan anorganik. Kayu jati juga merupakan bahan berpori, sehingga memiliki sifat higroskopik atau mudah menyerap air. Air mudah terserap dan mengisi pori-pori tersebut [3].

Kayu Jati

Kayu jati memiliki nama botani *Tectona grandis.* Di Indonesia kayu jati memiliki berbagai jenis nama daerah yaitu delek, dodolan, jate, jatih, jatos, kiati, kulidawa, dan lain-lain. Kayu ini merupakan salah satu kayu terbaik didunia. Berdasarkan PPKI 1961 termasuk kayu dengan tingkat pemakaian I, tingkat kekuatan II dan tingkat keawetan I. Pohon jati tumbuh baik pada tanah sarang terutama tanah yang mengandung kapur pada ketinggian 0-700 m di atas permukaan laut, di daerah dengan musim kering yang nyata dan jumlah curah hujan rata-rata 1200-2000 mm per-tahun. Banyak terdapat di seluruh Jawa, Sumatra, Nusa Tenggara Barat, Maluku dan Lampung [4].

Kayu jati memiliki sifat fisik antara lain daya hantar panas, daya hantar listrik, angka muai dan berat jenis. Perambatan panas pada kayu akan tertahan oleh pori–pori dan rongga–rongga pada sel kayu. Karena itu kayu bersifat sebagai penyekat panas. Semakin banyak pori dan rongga udaranya, daya hantar panas kayu semakin berkurang. Selain itu daya hantar panas juga dipengaruhi oleh kadar air kayu, pada kadar air yang tinggi daya hantar panasnya juga semakin besar [5].

Gambar 1. Kayu jati

Sistem Torefaksi

Torefaksi, atau pirolisis temperatur rendah, adalah *pretreatment* sebuah biomassa mentah untuk mendapatkan bahan bakar yang lebih stabil, memiliki kepadatan energi yang tinggi dan kerapuhan yang lebih tinggi dan *grindability*. Sifat ini dapat mengatasi beberapa kekurangan yang membatasi luas pemanfaatan biomassa mentah sebagai sumber energi terbarukan,seperti kadar air yang tinggi, kerapatan energi yang rendah (yaitu, *low heating value*), resistensi terhadap peluluhan (menjadi sulit dan berserat), tingginya harga transportasi dan umur simpan pendek, selain itu fakta bahwa biomassa mentah akan menyerap kelembaban lagi jika disimpan untuk jangka waktu, karena sifat hidrofilik, dan mungkin membusuk. Sebaliknya, torefaksi biomassa adalah hidrofobik. Keseimbangan penyerapan kelembaban biomassa torefaksi tergantung pada tingkat torefaksi, tapi biasanya sangat rendah (dari 1% sampai 6%). Akibatnya, torefaksi biomassa memiliki *shelf-life* lebih panjang daripada biomassa mentah. Peningkatan kerapuhan atau *grindability* torefaksi biomassa, dibandingkan dengan biomassa mentah, membuatnya cocok untuk penggilingan bersama, pemakanan bersama dan, pembakaran bersama dengan batubara dalam bubuk bahan bakar boiler [6]. Torefaksi adalah proses perlakuan panas pada temperatur 200-300^{o}C dalam tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen, dengan produk akhir bahan bakar padat bernilai kalor setara batubara tingkat sub-bituminous menurut kualifikasi standard ASTM D 388 [7].

Torefaksi dapat dilakukan pada berbagai macam biomassa seperti jerami, kayu, bambu. Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun [8].

Proses Torefaksi

Adapun tahapan perlakuan panas dalam proses torefaksi adalah sebagai berikut : [9]

1. Tahap pemanasan awal (*Predrying*)
   Pemanasan awal biomassa sampai tahap pengeringan biomassa tercapai. Di mana pada tahap ini kondisi pemanasan biomassa yang terjadi pada temperatur ~100^{o}C dari temperatur kamar menuju temperatur pengeringan.
2. Tahap pengeringan (*Drying*)
   Pada tahap ini terjadi kenaikan temperatur ~100^{o}C yang bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terdapat didalam biomassa pada suhu konstan sampai kandungan air yang terdapat pada permukaan biomassa menghilang.
3. Tahap pengeringan lanjut (*Postdrying*)
   Pada tahap ini biomassa dipanaskan lebih lanjut hingga temperatur mencapai ~200^{o}C sebelum terjadi proses torefaksi. Selama tahap ini berlangsung terjadi penguapan fraksi massa, kandungan air serta senyawa organik telah hilang dari biomassa.
4. Tahap torefaksi
   Selama tahap ini proses sebenarnya terjadi karena pada tahap ini terjadi proses depolimerisasi biomassa. Ketika tahap ini berlangsung diperlukan rentang waktu tertentu untuk proses ini sesuai dengan temperatur reaksi yang ditentukan. Selama proses torefaksi terjadi reaksi eksotermis pada temperatur 200-300^{o}C.
5. Tahap pendinginan
   Produk padatan yang dihasilkan dari proses torefaksi memiliki temperatur yang tinggi sehingga harus didinginkan hingga mencapai temperatur ruangan. Hal ini karena dikhawatirkan pada temperatur tinggi dapat menyebabkan produk torefaksi mengalami oksidasi setelah berkontak dengan udara.

Jenis-Jenis Reaktor Torefaksi

Reaktor adalah satu alat proses tempat terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia maupun nuklir. Dengan terjadinya reaksi inilah suatu bahan berubah ke bentuk bahan lainnya, perubahannya ada yang terjadi secara spontan (dengan sendirinya) atau bisa juga dengan bantuan energi seperti energi panas. Perubahan yang terjadi adalah perubahan kimia sehingga yang terjadi adalah bukan perubahan fase melainkan perubahan bahan, misalnya dari air menjadi uap. Berikut jenis-jenis reaktor torefaksi : [10]

1. Reaktor Tipe *Fixed Bed.*
   Reaktor ini merupakan reaktor paling sederhana yang digunakan pada proses torefaksi/pirolisis. Reaktor ini mempunyai karakteristik *heating rate* yang rendah sehingga koefisien perpindahan panas yang terjadi rendah, oleh karena itu ketika massa sampel yang diuji lebih besar suhu tidak seragam dalam sampel, dan bahan baku didekomposisi pada temperatur berbeda secara bersamaan.
2. Reaktor Tipe *Fluidized Bed*
   Reaktor *fluidized bed* bercirikan *heating rate* yang tinggi serta percampuran bahan baku yang baik, oleh Karena itu raktor ini lebih sering digunakan untuk menggambarkan pengaruh temperatur dan *residence time* pada produk pirolisis dan torefaksi. Biasanya reaktor *fluidized bed* digunakan untuk menyelidiki perilaku pirolisis cepat (*flash pyrolysis*) dan untuk mengeksplorasi *cracking tar* kedua. Meskipun reaktor *fluidized bed* telah banyak digunakan dalam penelitian laboratorium, namun dalam industri tipe ini jarang digunakan. Karena pemisahan material, serta pemanasan dan resirkulasi eksternal yang rumit.
3. Reaktor Tipe *Rotary kiln*
   Rotary kiln mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dari pada *fixed bed*. Putaran yang lambat dari *kiln* memungkinkan pencampuran yang baik dari material dalam reaktor. Reaktor ini banyak digunakan dalam pirolisis dan torefaksi dan yang banyak digunakan adalah tipe konvensional, yang berlangsung di bawah HR lambat dengan signifikan produk bagian dari *char*, cair dan gas. Dalam beberapa penelitian *heating rate* yang terjadi tidak lebih tinggi dari 100^{o}C/menit dan *residence time* hingga 1 jam, hal ini dikarenakan selama proses hanya dinding luar yang mengangkut panas dari luar untuk partikel.
4. Reaktor Tipe *Tubular*
   Reaktor jenis *tubular* merupakan jenis reaktor berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut. Reaktor tubular umumnya dipanaskan dengan sistem panas eksternal, dan dalam beberapa penelitian bahan baku di dalam material bergerak dengan system *secrew conveyor,* reaktor bujur sangkar yang

material digerakan dengan system *vibro-fluidiser*, atau tabung dengan *inner mixer*. Keuntungan dari reaktor ini meliputi; reaktor berjalan secara kontinyu, reaktor bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas yang lebih besar, dan *sintetic* gas yang mudah bereformasi.

Gelombang Mikro (*Microwave*)

Gelombang mikro atau *microwave* adalah gelombang elektromagnetik dengan frekuensi super tinggi (*Super High Frequency*, SHF), yaitu antara 300 Mhz – 300 Ghz. *Microwave* memiliki rentang panjang gelombang dari 1 mm hingga 1 m. Pemanfaatan gelombang mikro sudah diaplikasikan secara luas dalam berbagai bidang ilmu. Dalam elektronika seperti radio, televisi. Dalam teknologi komunikasi seperti radar, satelit, pengukuran jarak jauh, dan untuk penelitian sifat – sifat material. Kapasitas panas dari radiasi gelombang mikro sebanding dengan properti dielektrik dari bahan dan sebaran muatan elektromagnetiknya [11].

Gambar 2. Pemanas *microwave*

Cara Kerja *Microwave*

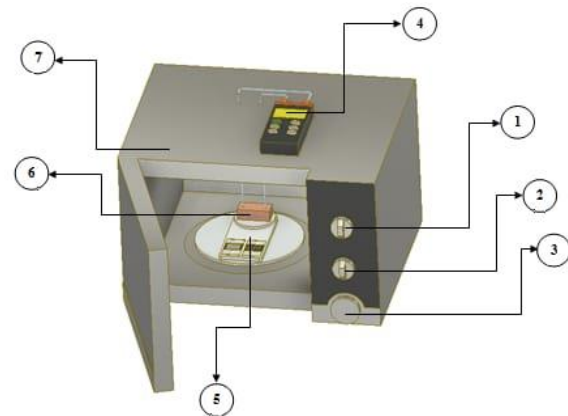
Berikut adalah cara kerja dari sebuah *microwave* dalam memanaskan sebuah objek: [12]

1. Arus listrik bolak-balik dengan beda potensial rendah dan arus searah dengan beda potensial tinggi diubah dalam bentuk arus searah.
2. Magnetron menggunakan arus ini untuk menghasilkan gelombang mikro dengan frekuensi 2,45 GHz.
3. Gelombang mikro diarahkan oleh sebuah antenna pada bagian atas magnetron ke dalam sebuah *waveguide*.
4. Waveguide meneruskan gelombang mikro ke sebuah alat yang menyerupai kipas, disebut dengan *stirrer*. *Stirrer* menyebarkan gelombang mikro di dalam ruang *microwave*.
5. Gelombang mikro ini kemudian dipantulkan oleh dinding dalam *microwave* dan diserap oleh molekul–molekul makanan.
6. Karena setiap gelombang mempunyai sebuah komponen positif dan negatif, molekul-molekul makanan didesak kedepan dan kebelakang selama 2 kali kecepatan frekuensi gelombang mikro, yaitu 4,9 juta kali dalam setiap detik.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Labotarium Material dan Teknologi Mekanik Fakultas Teknik Universitas Halu Oleo dengan menggunakan *microwave* untuk pengambilan data seperti pada gambar 3.

Bagian-bagian Sketsa Penelitian *Microwave*

Bagian–bagian sketsa *microwave* yang digunakan dalam penelitian ini di tunjukkan pada gambar 3 sebagai berikut :

Gambar 3. Sketsa penelitian pemanas *microwave*

Keterangan:

1. Tombol Pengaturan Suhu
2. Tombol Pengaturan Waktu
3. Tombol ON/OF
4. *Thermocouple*
5. Timbangan Digital
6. Benda uji
7. *Microwave*

Prosedur Penelitian

Adapun prosedur kerja pada penelitian ini yaitu sebagai berikut :

1. Menyiapkan alat dan bahan yang digunakan pada saat penelitian
2. Kayu jati dipotong dengan ukuran, 3cm x 3cm untuk sampel kubus, 7cm x 3cm x 3cm untuk sampel persegi panjang, dan 7cm x 3cm untuk tabung silinder.
3. Kemudian menimbang bahan untuk mengetahui massa awal benda uji.
4. Setelah itu dilakukan proses torefaksi dengan cara benda uji dimasukan kedalam *microwave*.

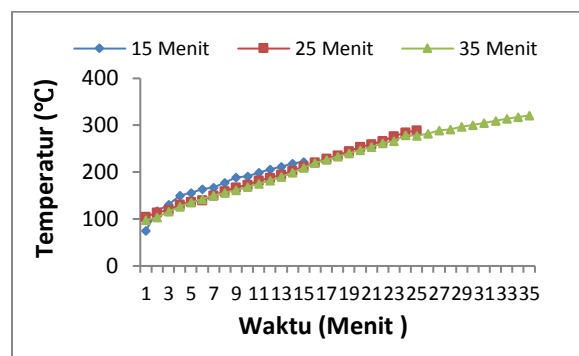
5. Proses torefaksi ini dilakukan dengan mengvariasikan waktu antara 15 menit, 25 menit, dan 35 menit. Sedangkan selang waktu pengambilan data proses torefaksi dilakukan setiap 1 menit sekali.
6. Setelah itu bahan ditimbang kembali untuk mengetahui massa bahan setelah proses torefaksi di *microwave*.
7. Bahan siap dilakukan pengambilan data.

3. Hasil dan Pembahasan

Data pengamatan temperatur terhadap waktu disajikan pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil pengamatan temperatur terhadap waktu pada setiap model sampel

No	Model 1 (Kubus)		
	T.15 (°c)	T.25 (°c)	T.35 (°c)
1	75,5	105,05	97,65
2	117,5	114,15	104,1
3	130,5	119,35	116,6
4	150	130,5	126,9
5	155,7	136,3	135,9
6	164	140,4	142,2
7	167,5	150,35	150,2
8	178	159,65	156,15
9	188,5	167	162,1
10	191,5	172,7	168,65
11	199	182,2	175,25
12	206,5	187,45	182,25
13	212	194,4	190,65
14	218,5	203	199,45
15	222,5	212,2	209,9
16		220,45	220,05
17		229,05	226,8
18		235,1	233,5
19		244,55	240,55
20		254,25	247,45
21		259	253,4
22		266,8	262
23		276,85	266,55
24		284,85	279,35
25		289,15	278,15
26			282,1
27			288,6
28			291,9
29			297,05
30			300,1
31			304,45
32			309,15
33			313,65
34			317,8
35			321

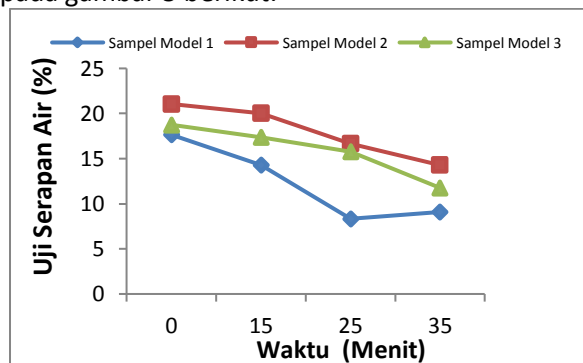
Dari tabel 1 di atas digambarkan hubungan temperatur terhadap waktu dapat dilihat pada gambar 4 berikut:

Gambar 4. Grafik hubungan temperature bahan terhadap waktu

Pada gambar 4 di atas menunjukan profil suhu *microwave* torefaksi sampel model 1 (kubus) dengan waktu torefaksi 15, 25, dan 35 menit. Awalnya torefaksi di uji dengan waktu 15 menit , suhu mencpai 200˚C dalam waktu 12 menit dan suhu maksimum 222,5˚C. ketika waktu torefaksi ditingkatkan menjadi 25 menit suhu maksimum mencapai 289,15˚C. Kemudian waktu torefaksi ditingkatkan kembali menjadi 35 menit sehingga suhu maksimum mencapai 321˚C. sehingga waktu torefaksi yang cocok yaitu pada waktu 15 dan 25 menit. Sedangakan dengan waktu torefaksi 35 menit suhu akhirnya melewati suhu untuk kebutuhan proses torefaksi yaitu berkisar pada suhu 200-300˚C.

Data pengamatan uji serapan air terhadap waktu torefaksi disajikan pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hasil pengamatan uji serapan air terhadap waktu torefaksi

Waktu	Model 1	Model 2	Model 3
0	17,647	21,052	18,75
15	14,285	20	17,391
25	8,333	16,667	15,789
35	9,09	14,285	11,764

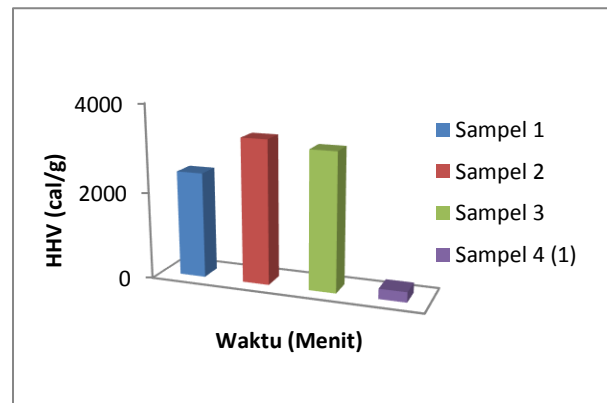
Dari tabel 2 di atas digambarkan hubungan uji serapan air terhadap waktu torefaksi dapat dilihat pada gambar 5 berikut:

Gambar 5. Grafik hubungan uji serapan air terhadap waktu torefaksi

Pada gambar 5 di atas menunjukan perbandingan nilai daya serap air kayu jati sampel model 1 (kubus), model 2 (persegi panjang), dan model 3 (tabung silinder.) Perendaman dilakukan seragam terhadap semua bahan selama 2 jam perendaman didalam air. Pada sampel model 1 sebelum ditorefaksi mengasilkan daya serap air sebesar 17,647%, sedangkan dengan waktu torefaksi 15 menit nilai serap airya sebesar 14,285%, dengan waktu torefaksi 25 menit nilai daya serap airnya sebesar 8,333%, kemudian dengan waktu torefaksi 35 menit nilai daya serap airnya sebesar 9,09%. Pada sampel model 2 sebelum ditorefaksi mengasilkan daya serap air sebesar 21,052, sedangkan dengan waktu torefaksi 15 menit nilai serap airya sebesar 20%, dengan waktu torefaksi 25 menit nilai daya serap airnya sebesar 16,667%, kemudian dengan waktu torefaksi 35 menit nilai daya serap airnya sebesar 14,285%. Pada sampel 3 sebelum ditorefaksi mengasilkan daya serap air sebesar 18,75%, sedangkan dengan waktu torefaksi 15 menit nilai serap airya sebesar 17,391%, dengan waktu torefaksi 25 menit nilai daya serap airnya sebesar 15,789%, kemudian dengan waktu torefaksi 35 menit nilai daya serap airnya sebesar 11,764%.

Maka pada torefaksi dengan waktu 15 menit nilai daya serap air terkecil pada sampel model 1 yaitu 14,285%, sedangkan dengan waktu torefaksi 25 menit nilai daya serap air terkecill pada sampel 1 yaitu 8,333% dan dengan waktu torefaksi 35 menit nilai daya serap air terkecil yaitu 9,09%. Data pengamatan nilai kalor kayu jati terhadap waktu torefaksi disajikan pada tabel 3 berikut:

Tabel 3. Hasil pengujian nilai kalor kayu jati

Waktu	Nilai Kalor Kayu Jati
15 m	2429,821
25 m	3147,078
35 m	3296,201

Dari tabel 3 diatas digambarkan hubungan nilai kalor kayu jati terhadap waktu torefaksi dapat dilihat pada gambar 6 berikut:

Gambar 6. Grafik hubungan nilai kalor kayu jati terhadap waktu torefaksi

Pada gambar 6 di atas menunjukan nilai kalor kayu jati model kubus. Pada pengujian sampel pertama dengan waktu torefaksi 15 menit menghasilkan nilai kalor sebesar 2429,821 cal/g. pada pengujian sampel kedua dengan waktu torefaksi 25 menit menghasilka nilai kalor sebesar 3147,078 cal/g kemudian pada pengujian sampel ketiga dengan waktu torefaksi 35 menit menghasilkan nilai kalor sebesar 3296,201 cal/g.. sedangkan pada penelitian sebelumnya oleh Huda 2021 [6] menggunakan media oven kemudian dikeringkan dioven selama 24 jam menghasilkan nilai kalor sebesar 235,25 cal/gram.

4. Kesimpulan

Adapun kesimpulan penelitian yang telah dilakukan yang didapatkan dari pembahasan diatas adalah: hasil kadar air pada variasi waktu 15, 25, dan 35 menit. Pada waktu torefaksi 15 menit kadar air yang diupakan terbesar pada sampel 3 sebesar 39,130%, pada waktu torefaksi 25 menit kadar air yang diupakan terbesar pada sampel 2 sebesar 58,333%, pada waktu 35 menit kadar air yang diupakan terbesar pada sampel 2 sebesar 80,982%. Hasil nilai kalor pada kayu jati dengan waktu torefaksi 15, 25, dan 35 menit menghasilkan nilai kalor masing-masing sebesar 2429,821 cal/gram, 3147,078 cal/gram, dan 3296,201 cal/gram. Hasil daya serap air pada kayu jati dengan waktu torefaksi 15, 25, dan 35 menit direndam 2 jam menghasilkan daya serapan air terkecil pada sampel model 1 (kubus) dengan nilai daya serap air untuk sampel 1, sampel 2, sampel 3 masing-masing sebesar 14,285%, 8,333%, dan 9,09%. Keuntungan torefaksi menggunakan microwave yaitu waktu yang dibutuhkan dalam proses torefaksi lebih cepat. Sedangkan kerugian torefaksi menggunakan microwave yaitu temperatur pada microwave tidak konstan.

Daftar Pustaka

[1] Saputra, F. D , Mustafidah, H. , and Suwarno, S. , "Sistem Pakar Menentukan Tingkat Kecocokan Lahan Untuk Tanaman Jati Menggunakan Metode Forward Chaining," *JUITA: Jurnal Informatika*, vol. 4, no. 1, pp. 37-47, 2016.

[2] Pramono, A. A. , Widyani, M. A. , Heriansyah, N. , and I Roshetko, J. M. , *Pengelolaan hutan jati rakyat: panduan lapangan untuk petani*.: CIFOR, 2010.

[3] Prameswari, M. D. , Nufutomo, T. K. , and Munandar, A. , "Penurunan Kadar BOD dan Warna pada Air Lindi Menggunakan Media Serbuk Kayu Jati (Studi Kasus: Air Lindi TPA Bakung, Bandar Lampung)," pp. 11-17, 2020.

[4] A. T. Wahyuni, "Sintesis Biosorben dari Limbah Kayu Jati dan Aplikasinya untuk Menjerap Logam Pb dalam Limbah Cair Artifisial (Doctoral dissertation, Universitas Negeri Semarang).," pp. 21-26, 2014.

[5] R. P. Firmanto, "Pemanfaatan limbah serbuk gergaji kayu jati sebagai adsorben pengurangan kandungan timbal (Pb) pada air limbah dengan menggunakan sistem batch (Doctoral dissertation, UIN Sunan Ampel Surabaya).," pp. 17-22, 2020.

[6] A. Afdholul Huda, "Analisa Nilai Kalor Briket Limbah Minyak Kayu Putih Yang Didinginkan Dengan Aliran Gas Nitrogen Menggunakan Mesin Microwave 800 Watt (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Ponorogo).," pp. 41-44, 2021.

[7] Amrul, A. , Triyadi, D. , and Gandidi, I. M. , "Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan Software Aspen Plus," *Mechanical*, vol. 10, no. 1, pp. 19-22, 2019.

[8] T. Yulianto, "Pengaruh Torefaksi Terhadap Sifat Fisis Black Pellet Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) (Doctoral dissertation, Universitas Lampung)," 2020.

[9] Nasution, Z. A. and Limbong, H. , "Pembuatan arang cangkang kelapa sawit dengan proses torefaksi.(Preparation of Palm Kernel Shell Charcoal Using Torrefaction Method)," *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, vol. 12, no. 1, pp. 14-20, 2017.

[10] H. J. Mona, "Perancangan Alat Hasil Pengembangan Dari Reaktor Arang Aktif Menggunakan Pipa Lorong Api Untuk Pembuatan Briket (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Manado).," 2016.

[11] Daniswara, E. F. , Rohadi, T. I. , and Mahfud, M. , "Ekstraksi Minyak Akar Wangi dengan Metode Microwave Hydrodistillation dan Soxhlet Extraction," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 2, pp. 381-384, 2017.

[12] Jubaedah, P. and Abrianto, H. , "Perancangan Sistem Komunikasi Radio Microwave Antara Onshore Dan Offshore," *SAINSTECH: Jurnal Penelitian dan Pengkajian Sains dan Teknologi*, vol. 21, no. 1, 2015.